НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ И СООБЩЕНИЙ

Том 3

XV Минский международный форум по тепло- и массообмену
XV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum
23 – 26 мая 2016 г.

Минск 2016

УДК 583.591:539.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ

С. А. Афанасьева, Н. Н. Белов, Е. Ф. Дударев, А. Н. Ищенко, А. Н. Табаченко, М. В. Хабибуллин, Н. Т. Югов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

В данной работе исследуется откол в титановом сплаве ВТ6 при воздействии пучка электронов (β-частицы). Параметры математической модели [1] исследуемого материала: начальная плотность материала матрицы $\rho_0 = 4.45$ г/см^3, объемная скорость звука в невозмущенном материале матрицы $c_0 = 5.11$ км/с, модуль сдвига $\mu_m = 42.62$ ГПа, предел текучести материала матрицы $\sigma_{sm} = 0.928$ ГПа, термодинамический коэффициент Грюнайзена $\gamma_0 = 1.33$, критический объем пустот в единице объема $\xi_* = 0.1$, $3R_\mu T_0/A = 153$ кДж/кг, R_μ – универсальная газовая постоянная, A – атомный вес, $T_0 = 293$ К, температура плавления на начальной изохоре $T_{n0} = 2651$ К, константы материала матрицы $\psi_1 = 3.4652$, $\psi_2 = 2.352$, $\psi_3 = 0.479$, $\psi_4 = 3.52$, $\alpha_0 = 1.0002$, $\alpha_{00} = 1.0002$, $\alpha_s = 0.62$ ГПа.

Для оценки температуры материала, исходя из соотношений термодинамики, получено следующее приближенное соотношение:

$$T = T_0\left\{\exp\left[\gamma_0(1-\delta)\right] + \frac{A\left[\varepsilon - \varepsilon_s(\rho_m)\right](1+L_1)}{3R_\mu T_0(1+L_1/\delta)}\right\},$$

$$\varepsilon_s(\rho_m) = \begin{cases} \dfrac{3c_0^2}{\psi_1 - 4}\left\{\dfrac{3}{\psi_1}\exp\left[\psi_1\left(1-\delta^{1/3}\right)\right] - \delta^{-1} + \dfrac{\psi_1 - 3}{\psi_1}\right\} & \text{при} \quad \delta > 1, \\ \dfrac{9c_0^2}{2\psi_2^2}\left\{\exp\left[\psi_2\left(1-\delta^{1/3}\right)\right] - 1\right\}^2 & \text{при} \quad \delta \le 1, \end{cases}$$

где $L_1 = \dfrac{\varepsilon\psi_1(\psi_1 - 4)}{3c_0^2(\psi_1 - 3)}$, $\delta = \dfrac{\rho_0}{\rho_m}$, ρ_m – плотность материала матрицы.

Облучение пластин толщиной 3 мм из сплава ВТ6 проводилось при длительности импульса 0.05 мкс и плотности мощности $q_0 = 2.3 \cdot 10^{10}$ Вт/см^2.

В представленных расчетах полагалось: радиус зоны энергопоглощения – 3 мм, линейный коэффициент поглощения $\alpha_1 = 46$ см$^{-1}$. Расчеты велись вплоть до момента образования откола. Откольная прочность сплава ВТ6 составляет 5.28 ГПа. Моментом завершения откольного макроскопического разрушения тела является достижение объемом пустот в единице объема ξ критического значения $\xi_* = 0.1$, разрушение происходит хрупко. На рис. 1 представлены результаты расчета облучения образца толщиной 3 мм в виде распределения параметров потока в поле течения в плоскости симметрии цилиндрической системы координат (x, r, см) в различные моменты времени.

Воздействие электронного пучка приводит к плавлению, испарению и разлету материала на лицевой поверхности мишени, а также к ее откольному разрушению. Выход на тыльную свободную поверхность пластины ударной волны, сгенерированной пучком, вызывает увеличение скорости поверхности. Отражение ударной волны от поверхности

приводит к появлению волны разрежения. Вслед за ударной волной на поверхность выходит падающая волна разгрузки, которая вызывает уменьшение скорости поверхности. В процессе разрушения, являющегося следствием взаимодействия встречных волн разгрузки, растягивающие напряжения быстро релаксируют к нулю. В результате в растянутом материале появляется волна сжатия, которая выходит на поверхность в виде откольного импульса. Последующие колебания скорости вызваны многократными отражениями волн между тыльной поверхностью образца и плоскостью откола (рис. 2).

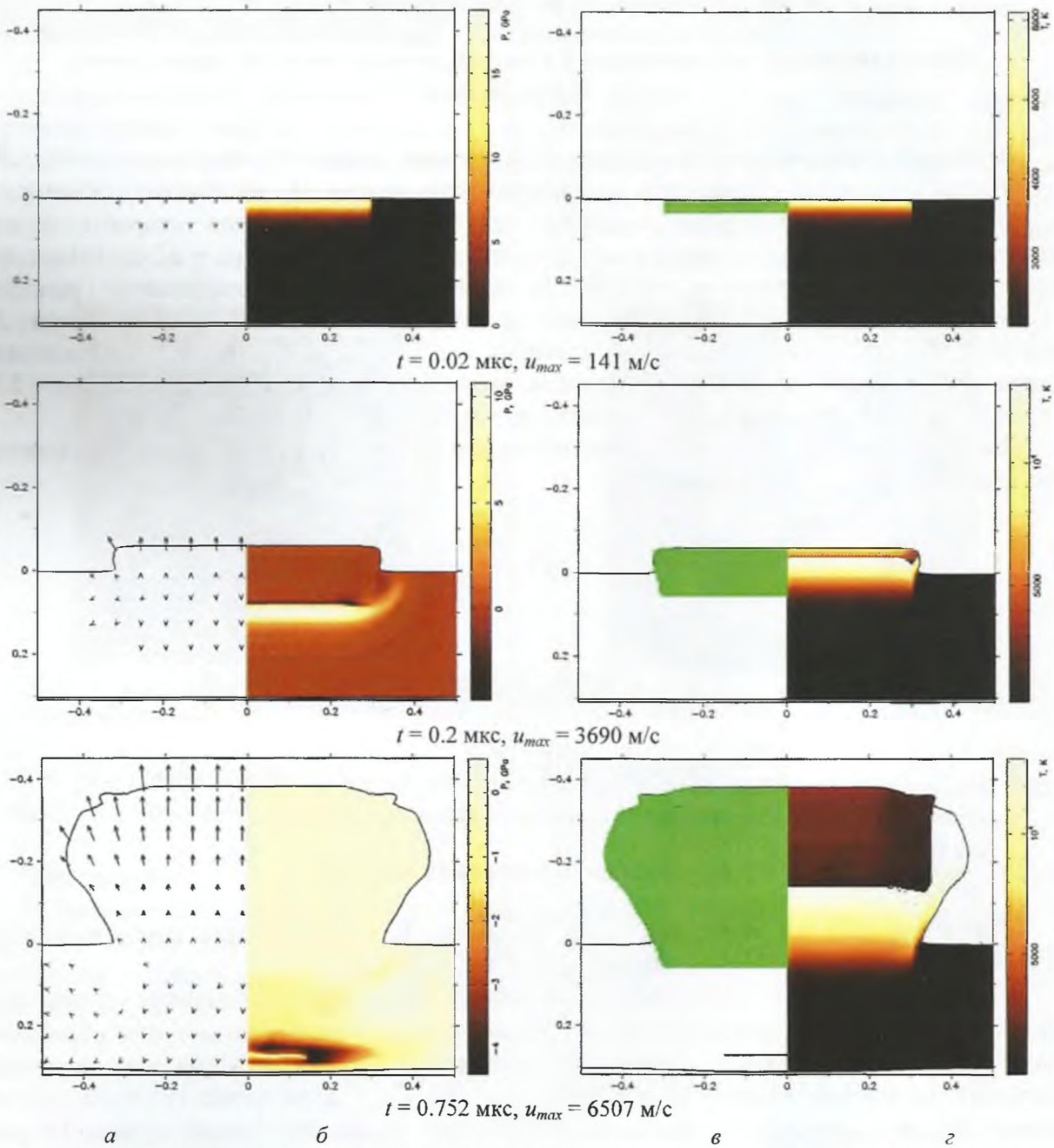

Рис. 1. Хронограмма облучения образца толщиной 3 мм: *а* – поле вектора скорости относительно u_{max}, *б* – поле давления (ГПа), *в* – зона разрушения, *г* – поле температуры (К)

Расчетная толщина откольного слоя в центре откола равна 0.42 мм (в эксперименте – 0.43 мм). Температура достигает значения $T \approx 14\,000$ К. Разлет вещества происходит с ускорением. Максимальное давление в момент времени 0.02 мкс, т. е. во время облучения, составляет $p \approx 19$ ГПа. Максимальное напряжение ($\sigma \approx 23.5$ ГПа) достигается к концу процесса

облучения (рис. 3). Поры образуются в жидкой фазе и в месте откола (рис. 4). Откольный импульс (1.82 ГПа) падает на свободную поверхность (рис. 5) и отражается от нее в виде волны разрежения (рис. 6). Откол скачкообразно увеличивает температуру с $T \approx 320$ К до $T \approx 450$ К (рис. 7).

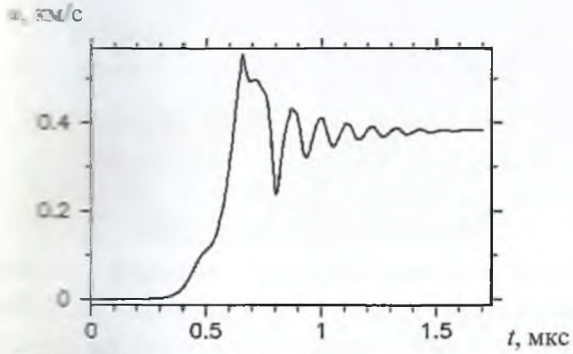

Рис. 2. Профиль скорости центра свободной поверхности при отколе

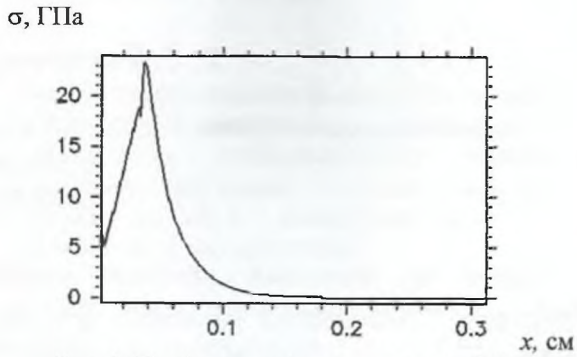

Рис. 3. Профиль напряжения при $t = 0.05$ мкс

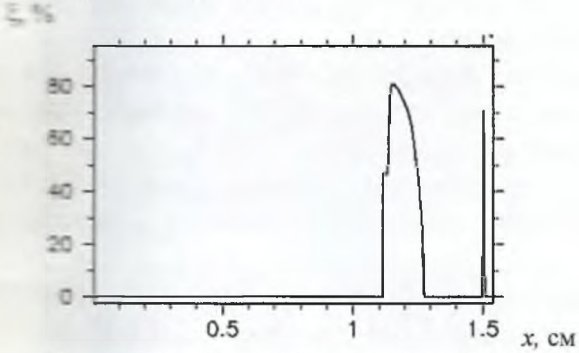

Рис. 4. Профиль пористости при $t = 0.816$ мкс

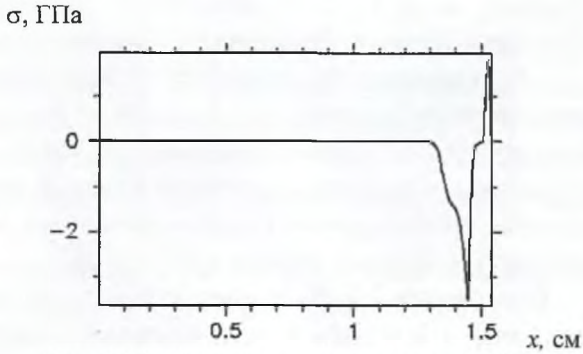

Рис. 5. Профиль напряжения при $t = 0.816$ мкс

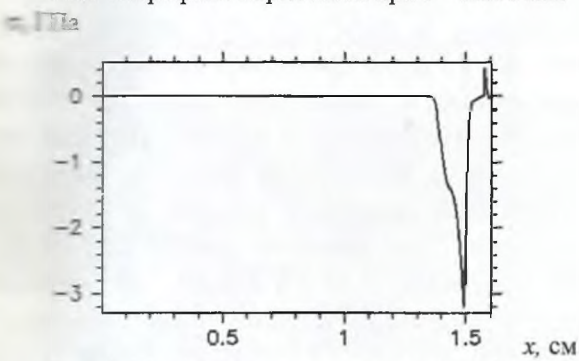

Рис. 6. Профиль напряжения при $t = 0.85$ мкс

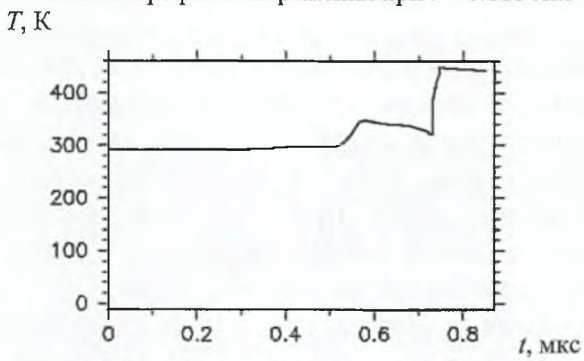

Рис. 7. Зависимость температуры в сечении, где происходит откол

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 9.1.02.2015 в рамках Программы «Научный фонд им. Д. И. Менделеева Томского государственного университета», а также гранта РФФИ №15-08-04118 а.

Литература

1. Афанасьева С. А., Белов Н. Н., Дударев Е. Ф., Табаченко А. Н., Хабибуллин М. В., Югов Н. Т. Разрушение мишеней при воздействии наносекундного релятивистского сильноточного электронного пучка // Изв. ВУЗов. Физика. 2013. Т. 56, № 2. С. 80–88.